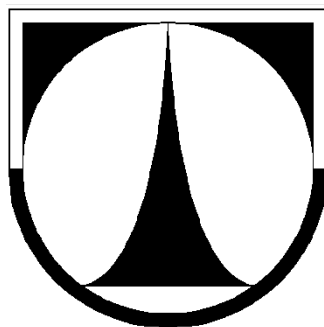


Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



Marek Holík

**Měření obráběcích sil a tuhosti konstrukce prototypu CNC  
stroje**

Bakalářská práce

2010

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra výrobních systémů

Obor: Strojírenství

Zaměření: Výrobní systémy

## **Měření obráběcích sil a tuhosti konstrukce prototypu CNC stroje**

### **Measuring of forces and rigidity of CNC machine prototype**

KVS - VS - 72

**Marek Holík**

Vedoucí práce: Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Počet stran: 33

Počet příloh: 4

Počet obrázků: 19

Počet tabulek: 1

Počet grafů: 8

Počet modelů nebo  
jiných příloh: 0

V Liberci: 25. 5. 2010

**TÉMA: Měření obráběcích sil a tuhosti konstrukce prototypu CNC stroje**

**ANOTACE:** Práce se zabývá problematikou praktického měření obráběcích sil při různých režimech frézování. Dále jejich vyhodnocení a následné použití při měření tuhosti rámu u prototypu CNC frézky.

**THEME: Measuring of forces and rigidity of CNC machine prototype**

**ANNOTATION:** The study deals with questions of force measuring in various milling modes. The next part rate those forces and uses them in rigidity analysis of CNC milling machine prototype frame.

**Klíčová slova:** Měření sil, měření tuhosti, CNC frézka

**Zpracovatel:** TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů

**Dokončeno:** 2010

**Archivní označení zprávy:**

**Počet stran:** 33

**Počet příloh:** 4

**Počet obrázků:** 19

**Počet tabulek:** 1

**Počet grafů:** 8

**Počet modelů nebo jiných příloh:** 0

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne: 25. 5. 2010

Podpis:.....

Marek Holík

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Petru Zelenému, Ph.D. za vedení bakalářské práce a Katedře obrábění a montáže za zapůjčení měřicího zařízení. Rovněž bych rád poděkoval rodičům a blízkým za podporu při studiu.

## Obsah

<i>Seznam použitých zkratk a symbolů</i> .....	7
<b>1. Úvod</b> .....	9
<b>2. Cíle Bakalářské práce</b> .....	9
<b>3. Úvod do problematiky</b> .....	10
3.1. Frézování .....	10
3.1.1. Podstata metody .....	10
3.1.2. Síly při frézování .....	11
3.1.3. Měřicí zařízení Kistler .....	13
3.1.4. Řezné podmínky .....	14
3.2. Tuhost .....	17
3.2.1. Zjišťování tuhosti měřením .....	20
3.3. Prototyp CNC frézky .....	22
<b>4. Praktické provedení měření</b> .....	23
4.1. Vlastní měření řezných sil .....	23
4.1.1. Analýza výsledků naměřených sil .....	24
4.2. Vlastní měření tuhosti rámu .....	27
4.2.1. Analýza výsledků tuhosti rámu .....	28
<b>5. Zhodnocení</b> .....	30
<b>6. Závěr</b> .....	31
<i>Seznam použité literatury</i> .....	32
<i>Seznam Příloh</i> .....	33

## Seznam použitých zkratk a symbolů:

$A$	- průřez třísky	$[\text{mm}^2]$
$A_z, A_1$	- průřez třísky odebírané jedním zubem	$[\text{mm}^2]$
$A_{z\max}$	- maximální průřez třísky odebírané jedním zubem	$[\text{mm}^2]$
$a_1$	- tloušťka třísky odebíraná jedním zubem	$[\text{mm}]$
$a_{\max}$	- maximální tloušťka třísky	$[\text{mm}]$
$B$	- šířka obrobku	$[\text{mm}]$
$b$	- šířka třísky	$[\text{mm}]$
$D$	- průměr frézy	$[\text{mm}]$
$F$	- napínací síla	$[\text{N}]$
$F_c$	- řezná síla	$[\text{N}]$
$F_{ci}$	- řezná síla působící na jeden zub	$[\text{N}]$
$F_f$	- posuvová síla	$[\text{N}]$
$F_x$	- řezná síla ve směru x	$[\text{N}]$
$F_y$	- řezná síla ve směru y	$[\text{N}]$
$F_z$	- řezná síla ve směru z	$[\text{N}]$
$h$	- hloubka řezu	$[\text{mm}]$
$k_k$	- tuhost v posunutí	$[\text{N}.\text{mm}^{-1}]$
$k_n$	- tuhost v natočení	$[\text{Nm}.\text{rad}^{-1}]$
$k_0$	- tuhost v ohybu	$[\text{N}.\mu\text{m}^{-1}]$
$k_p$	- tuhost v posunutí	$[\text{N}.\text{mm}^{-1}]$
$M_k$	- točivý moment	$[\text{N}.\text{m}]$
$n$	- otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
$P_{ef}$	- efektivní výkon	$[\text{W}]$

$p$	- měrný řezný odpor	[MPa]
$q$	- absolutní člen rovnice přímky	
$s$	- posuv	[mm]
$s_0$	- posuv na otáčku	[mm]
$s_z$	- posuv na zub	[mm]
$v_c$	- řezná rychlost	[m.min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	- rychlost posuvu	[mm.min <sup>-1</sup> ]
$X$	- x-ová souřadnice stroje	[mm]
$Y$	- y-ová souřadnice stroje	[mm]
$y$	- deformace	[μm]
$Z$	- z-ová souřadnice stroje	[mm]
$z$	- počet zubů	
$z'$	- počet zubů v záběru	
$\varphi$	- úhel zkroucení	[rad]
$\varphi_1$	- úhel okamžité polohy zubu, úhel stoupání šroubovice	
$\varphi_{\max}$	- záběrový úhel	
$k_p$	- tuhost v posunutí	[N.mm <sup>-1</sup> ]



## **1. Úvod**

V dnešní době jsou na obráběcí stroje kladeny vysoké nároky ve všech směrech, může se jednat o spolehlivost, životnost, ovladatelnost, jakost obrobené plochy, údržbu, účinnost, váhu či rozměry. Ovšem jedním z klíčových parametrů obráběcího stroje je jeho přesnost, která úzce souvisí s tuhostí konstrukce. Přesnost stroje se projeví na hotovém výrobku vysokou geometrickou přesností tvaru i rozměru.

Na stroj při práci působí síly, které způsobují napětí v rámu a deformují ho. To zapříčiňuje změnu polohy nástroje vůči obráběnému předmětu a tím se deformace rámu promítá na jeho tvar. Pokud tedy požadujeme, aby rozměry obrobku byly v určitých mezích, pak je potřeba, aby v těchto mezích byly i deformace všech součástí stroje.

## **2. Cíle Bakalářské práce**

Cílem této bakalářské práce je změřit obráběcí síly na prototypu CNC frézky. Naměřené síly bude potřeba vyhodnotit, určit které podmínky je jak ovlivňují a následně těmito silami zatěžovat konstrukci stroje. Působení sil vyvolá deformaci a z těchto dvou známých veličin určit tuhost konstrukce.

### 3. Úvod do problematiky

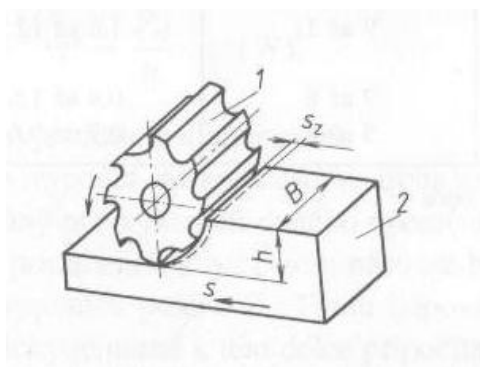
#### 3.1. Frézování

Frézování je obrábění rovinných nebo tvarových ploch, vnitřních nebo vnějších, vícebřitým nástrojem [2]. V porovnání např. se soustružením jde z historického hlediska o mladší způsob. Stroje na frézování se nazývají frézky a jedny z prvních byly sestaveny již na počátku 18. století. Ovšem dnešní podobu získaly až koncem 19. století. Z hlediska rozšíření jsou po soustruzích hned na druhém místě. Nejčastěji se používají k frézování rovinných ploch, či ploch zborcených nebo přímkových.

##### 3.1.1. Podstata metody

Nástroj se nazývá fréza, která bývá ve většině případů vícebřitá. Nejvýhodnější je je-li v záběru více břitů současně, což příznivě působí na chvění. Při frézování koná hlavní řezný pohyb nástroj, jedná se o pohyb rotační. Obrobek koná pohyb posuvný nejčastěji přímočarý, někdy otáčivý, či obecný pohyb po křivce. Řezný proces je přerušovaný, jednotlivé zuby nástroje postupně vnikají a vycházejí z materiálu a odebírají třísku proměnného průřezu. [2]

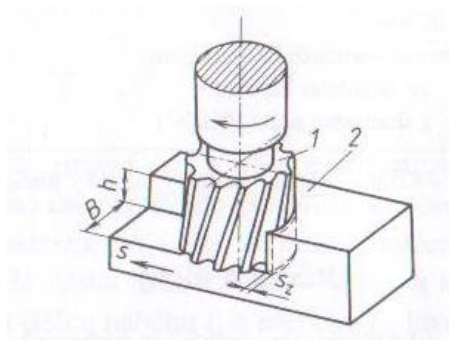
Hlavní způsoby frézování jsou dva, jedná se o frézování obvodem válcové frézy (obr. 3.1) a čelem čelní frézy (obr. 3.2).



**Obr. 3. 1. Frézování obvodem válcové frézy [2]**

1 – fréza, 2 – obrobek, B – šířka obrobku, h – hloubka řezu,

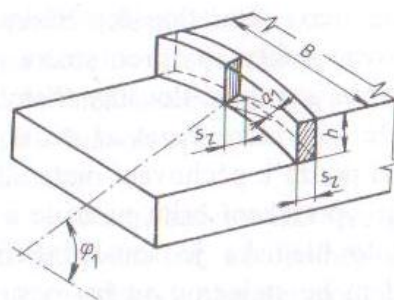
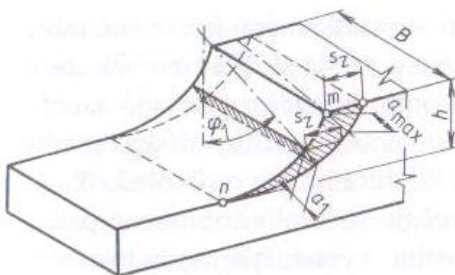
s – posuv,  $s_z$  – posuv na zub



**Obr. 3. 2. Frézování čelem čelní frézy [2]**

1 – fréza, 2 – obrobek, B – šířka obrobku, h – hloubka řezu,  
s – posuv,  $s_z$  – posuv na zub

V případě frézování válcovou frézou obrábí fréza zuby na obvodě. V našem případě se jedná o frézování čelní, pak řeže fréza současně zuby na obvodě a na čele. Na následujících obrázcích (3.3. a 3.4.) je znázorněn průřez třísky odebíraný jedním zubem frézy.



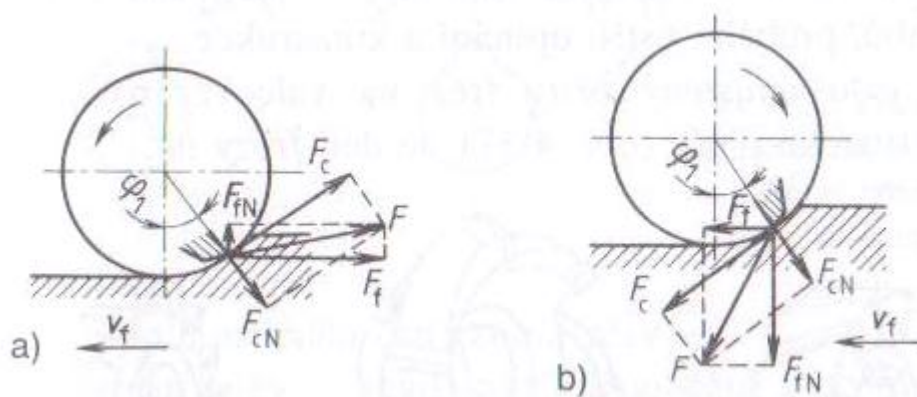
**Obr. 3. 3. Průřez třísky odebíraný při válcovém frézování    Obr. 3. 4. Průřez třísky odebíraný při čelním frézování**

B – šířka obrobku, h – hloubka řezu,  $s_z$  – posuv na zub,  $a_1$  – tloušťka třísky pro úhel  $\varphi_1$ ,  
 $a_{\max}$  – maximální tloušťka třísky [2]

### 3.1.2. Síly při frézování

Další způsoby frézování jsou závislé na smyslu otáčení frézy, pak jde buď o sousledné či nesousledné frézování (obr. 3.5.). Řezný pohyb se skládá ze dvou pohybů a to rotačního pohybu frézy a přímočarého pohybu obrobku. Výsledný relativní pohyb ostří vůči obrobku je zkrácená cykloida. Díky malé rychlosti posuvu proti obvodové

rychlosti frézy se tato cykloida blíží kružnici. Posuvem na zub  $s_z$  se nazývá vzdálenost dráhy, kterou obrobek ujede během pootočení frézy o jednu zubovou rozteč. Délka mezi dráhami po sobě jdoucích břitů, které je měřena v radiálním směru, se označuje jako tloušťka třísky  $a$ . Její maximální možná hodnota ( $a_{\max}$ ) se rovná posuvu na zub. Průběh tloušťky třísky je odlišný u sousledného a nesousledného frézování a to tak, že u sousledného se mění od určitého maxima do minima. U nesousledného frézování je průběh změny tloušťky třísky v opačném pořadí. [2]



**Obr. 3. 5. Frézování a) nesousledné, b) sousledné [2]**

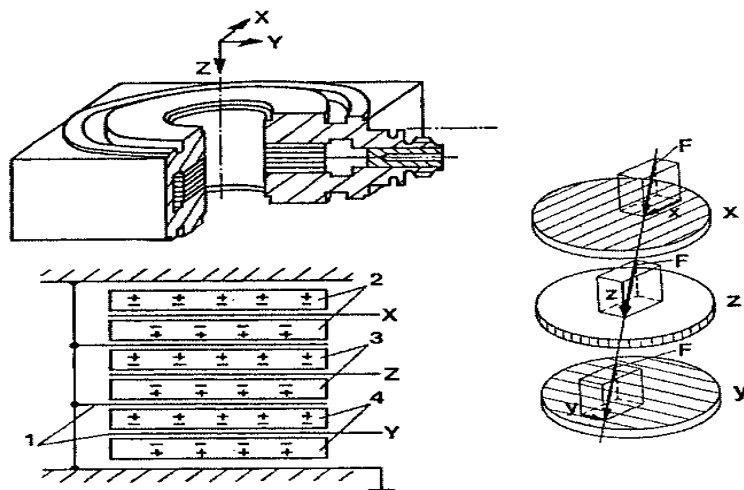
$F$  – řezná síla,  $F_c$ ,  $F_{cn}$ ,  $F_f$ ,  $F_{fn}$  – složky řezné síly,  $v_f$  – rychlost posuvu,

$\phi_1$  – úhel okamžité polohy zubu

Při sousledném frézování je směr vodorovné složky síly shodný se směrem posuvu a svislá složka síly tlačí obrobek proti stolu frézky. Zub frézy zabírá v místě tloušťky třísky. Při nesousledném frézování je směr vodorovné složky síly proti směru posuvu a svislá složka síly obrobek zvedá. Zub zabírá z nulové tloušťky třísky. V tomto případě způsobuje zaoblení ostří, že zub začne řezat až po dosažení určité tloušťky třísky, předtím dochází pouze k přechovávání materiálu a ke tření hřbetu o obrobek. Tím se zvyšuje opotřebení břitu nástroje a zhoršuje se kvalita obrobené plochy. Z tohoto hlediska je sousledné frézování výhodnější, vyžaduje však, vzhledem ke stejnému směru posuvu a vodorovné složky řezné síly  $F_f$ , vymezení vůle v posuvovém mechanismu stroje.

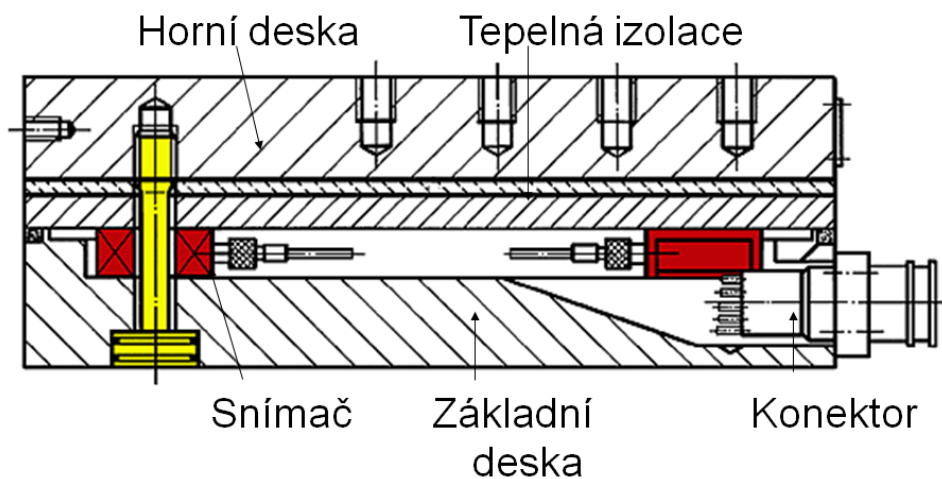
### 3.1.3. Měřicí zařízení Kistler

Měření řezných sil bylo provedeno na stabilním dynamometru Kistler, který byl zapůjčen z Katedry obrábění a montáže. Zařízení vyhodnocuje síly za pomoci piezoelektrických snímačů měřící tlak. Jedná se o 3-složkový dynamometr typ 9257B (obr. 3.7. a 4.1.). Síly jsou snímány za pomoci snímače, který rozloží obecnou sílu do třech složek souřadnicového systému (obr. 3.6.).



Obr. 3.6. 3-složkový snímač síly [7]

Z dynamometru jde signál do vícekanálového zesilovače, který je napojen na stolní počítač vyhodnocující výsledky (obr. 3.8.).



Obr. 3.7. 3-složkový dynamometr typ 9257B [7]



Obr. 3.8. Vícekanálový zesilovač a stolní PC vyhodnocující výsledky

#### 3.1.4. Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je závislá na vlastnostech stroje, nástroje, obrobku i prostředí a na požadovaných parametrech frézování ploch obrobku. Proto je důležité se řídit doporučeními výrobce nástrojů, které jsou uvedeny v katalogích a příručkách.

Pro frézování jsou řezné podmínky dány tabulkami. Hodnoty jsou závislé na spoustě parametrů, jako je druh obráběného materiálu, třída obrobitelnosti, materiál nástroje případně dle typu frézy. U hrubování může být hloubka řezu od 10 do 20mm i více, při obrábění načisto bývá kolem 0,5 až 2mm. Posuv na zub by neměl klesnout pod 0,05mm. Pak už se začíná projevovat vliv poloměru ostří břitu nástroje. To platí zejména pro nástroje s břity z povlakových slinutých karbidů.[2]

Na frézce se volí otáčky vřetene a rychlost posuvu stolu, ostatní hodnoty je třeba dopočítat.

Velikost řezné rychlosti  $v_c$ , tedy obvodové rychlosti frézy,

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

kde  $D$  je průměr frézy [mm]

$n$  – otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ]

Rychlost posuvu stolu frézky  $v_f$  se udává v  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Z hlediska záběru zubů je důležitější hodnota posuvu na zub  $s_z$ :

$$s_z = \frac{v_f}{z \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

$z$  – počet zubů frézy

Posuv na otáčku  $s_0$  představuje dráhu, kterou urazí obrobek za jednu otáčku frézy:

$$s_0 = s_z \cdot z \quad (3)$$

Průřez třísky, odebíráme jedním zubem frézy, je

$$A_z = a \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (4)$$

Kde  $a$  je tloušťka třísky [mm]

$b$  – šířka třísky [mm]

Maximální průřez třísky odebírá zub frézy v okamžiku, kdy je tloušťka třísky maximální:

$$A_{zmax} = a_{max} \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (5)$$

Průřez třísky odebíraný jedním zubem válcové nebo kotoučové frézy s přímými zuby je znázorněn na obrázku 3.3. Pro obecnou polohu zubu, danou úhlem  $\varphi_1$ , je tloušťka třísky

$$a = s_z \cdot \sin \varphi_1 \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

Plocha průřezu třísky odebírané jedním zubem

$$A_1 = a_1 \cdot B \quad [\text{mm}^2] \quad (7)$$

U čelní frézy určíme plochu průřezu třísky obdobně (obr. 3.4.)

$$A_1 = a_1 \cdot h \quad [\text{mm}^2] \quad (8)$$

Řezné síly působící na zub frézy jsou znázorněny na obr. 3.5. Hlavní složkou řezné síly  $F_{ci}$ , působící na jeden zub frézy, vypočteme z měrného řezného odporu  $p$  a plochy průřezu  $A$  odebírané třísky:

$$F_{ci} = p \cdot A \quad [\text{N}] \quad (9)$$

Točivý moment  $M_k$  na fréze

$$M_k = \frac{d}{2} \sum_1^{z'} F_{ci} \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

kde  $z'$  je počet zubů frézy v záběru,

$d$  – průměr frézy.

Počet zubů frézy v záběru

$$z' = \frac{\varphi_{\max}}{\frac{2\pi}{z}} \quad (11)$$

kde  $\varphi_{\max}$  je záběrový úhel frézy

$z$  – počet zubů frézy

Efektivní výkon potřebný pro frézování

$$P_{ef} = v_c \sum_1^{z'} F_{ci} \quad [\text{W}] \quad (12)$$



### 3.2. Tuhost

Největší vliv na přesnost práce mají deformace součástí obráběcího stroje, nástroje a obrobku. Jsou způsobené řeznou silou (řezným odporem), mají vliv na relativní polohy nástroje vzhledem k obrobku a tím na přesnost rozměrů a tvarů obrobku. Měřítkem odolnosti proti deformaci je tzv. tuhost, která se definuje jako poměr mezi zatížením a přetvořením v místě zatížení. Tuhost má rovněž vliv na klidnost chodu stroje. Rozeznávají se dva druhy deformací a to posunutí a natočení, čili se rozlišují i dva základní druhy tuhosti, tuhost v posunutí, definovaná jako poměr mezi silou a posunutím, daný deformacemi způsobenými tímto zatížením

$$k_p = \frac{F}{y} \quad [\text{N.mm}^{-1}] \quad (13)$$

a tuhostí v natočení, definovaná jako poměr mezi momentem  $M$  a natočením  $\varphi$ , daný příslušnými deformacemi.[1]

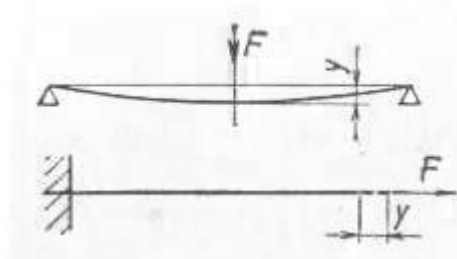
$$k_n = \frac{M}{\varphi} \quad [\text{Nm.rad}^{-1}] \quad (14)$$

Tuhost se určuje buď pro každou součást stroje zvlášť – dílčí tuhost, např. tuhost samotného vřetena bez vlivu deformace ložisek, skříně vřeteníku a spojení vřeteníku s ložem, nebo pro celou soustavu součástí různými způsoby spolu spojených – tuhost celková. Což je i případ této práce. Dílčí tuhost se řeší většinou tehdy, má-li se kontrolovat vhodnost volby rozměrů, tvaru a materiálu uvažované součásti. Měří-li se deformace vůči základu stroje, mluví se o tuhosti absolutní, měří-li se relativní deformace dvou součástí vůči sobě, mluví se o tuhosti relativní.

Podle způsobu zatížení se dělí tuhost na statickou, je-li zatížení stálé, a tuhost dynamickou, je-li zatížení periodicky proměnlivé. Při dynamické tuhosti vzniká v zatížené soustavě vynucený kmitavý pohyb a dynamická tuhost se definuje jako poměr mezi amplitudou zatížení a amplitudou deformace. V této práci půjde jen o tuhost statickou.

Dle způsobu zatížení se dělí na tuhost v tahu, ohybu a krutu. Smykové deformace jsou obvykle zanedbatelné. Rovněž deformace tahové a tlakové jsou se zřetelem na tvary a rozměry součástí obráběcích strojů nepatrné, a proto se tuhost v tahu (tlaku) nevyšetřuje (až na zvláštní případy) [1].

Statická tuhost v ohybu je podle obr. 3.9.

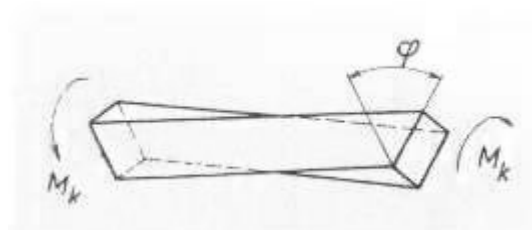


**Obr. 3.9. Definice tuhosti v ohybu a tahu (tlaku) [1]**

$$k_0 = \frac{F}{y} \quad [\text{N} \cdot \mu\text{m}^{-1}] \quad (15)$$

Stejný vztah platí i pro tuhost v tahu a tlaku. Kde je  $F$  [N] síla,  $y$  [ $\mu\text{m}$ ] deformace v místě zatížení.

Statická tuhost v krutu je dle obr. 3.10.



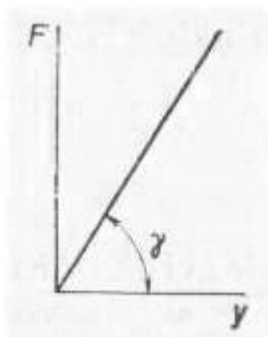
**Obr. 3.10. Definice tuhosti v krutu[1]**

$$k_k = \frac{M_k}{\varphi} \quad [\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1}] \quad (16)$$

Kde  $M_k$  je krouticí moment [Nm],  $\varphi$  – je úhel zkroucení (v obloukové míře) v místě působení momentu.

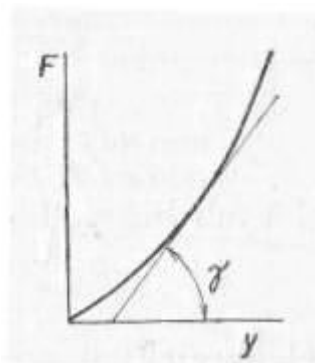
Dílčí tuhost součástí, pro něž platí Hookeův zákon, je konstantní. Závislost mezi zatížením a deformací je dána přímkou procházející počátkem (obr. 3.11.) a tuhost je vyjádřena tangentou úhlu sklonu.

$$k = \operatorname{tg} \gamma \quad (17)$$



**Obr. 3.11.** Závislost mezi deformací a zatížením, je-li tuhost konstantní[1]

Pro celkovou tuhost spojených součástí a pro některé případy dílčí tuhosti tato závislost neplatí a tuhost závisí na velikosti zatížení (obr. 3.12.).



**Obr. 3.12.** Závislost mezi deformací a zatížením, není-li tuhost konstantní[1]

Pak platí:

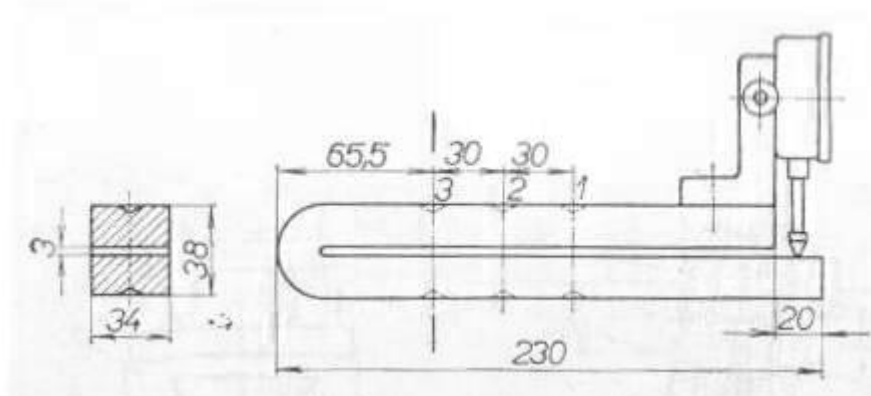
$$k_p = \frac{dF}{dy} \quad (18)$$

$$k_n = \frac{dM}{d\varphi} \quad (19)$$

### 3.2.1. Zjišťování tuhosti měřením

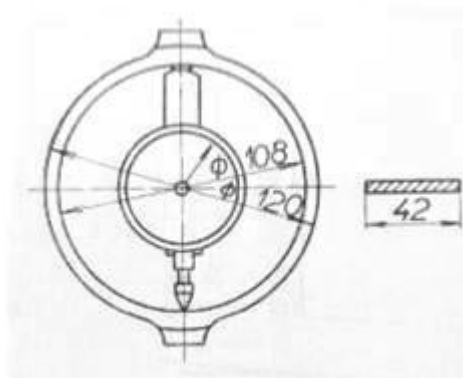
Tuhost spojených součástí se dá spolehlivě určit pouze měřením přímo na stroji. Ve výpočtech lze jen těžko postihnout všechny parametry, proto jsou tyto výpočty přibližné. Výpočtem se dá spolehlivě a jednoduše zjistit jen tuhost jednoduchých součástí. Měření se provádí obvykle pouze při porovnání dvou navržených konstrukčních alternativ nebo při porovnání nového provedení se starým. Většinou se podobně proměřuje tuhost prototypu a podle zjištěných výsledků se navrhuje konstrukční změny stroje, které se mají sériově vyrábět.

Pro určení tuhosti je třeba změřit deformaci vyvozenou zatížením. Velikost zatížení se měří dynamometry. Nejjednodušší jsou dynamometry pružinové. Velikost zatěžovací síly se zjistí měřením deformace pružiny dynamometru úchytkoměrem. Pro menší síly (od 3000 do 13000N) je vhodný třmenový tvar (obr. 3. 13.).



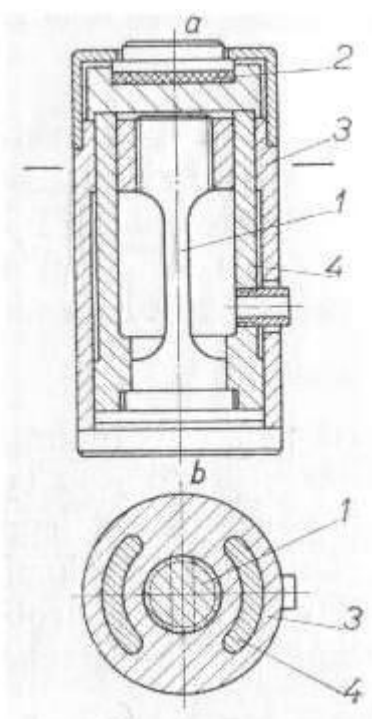
Obr. 3. 13. Pružinový dynamometr třmenový[1]

Rozsah se změní změnou působivé síly. Pro větší zatížení (až do 30000N) je vhodný dynamometr kroužkový (obr. 3.14.). Výhodou pružinových dynamometrů je jejich jednoduchost a spolehlivost při postačující přesnosti. Nevýhodou jsou velké rozměry, proto se jich nedá použít všude. Pro zachování přesnosti se nesmějí přetěžovat. Jako materiál se volí nástrojová ocel. V našem případě by se nehodil, jelikož nám bude více vyhovovat zařízení s malým rozsahem i rozměry.



**Obr. 3. 14. Pružinový dynamometr kroužkový[1]**

Dnes se dají použít tenzometrické dynamometry, mezi jejich klady patří velká citlivost a malé rozměry. Síla se určuje podle deformace měřené odporovým tenzometrem. Měřicí rozsah bývá do 30000N. Konstrukce dynamometru, u něhož je měrné tělísko namáháno v tahu, je na obr. 3. 15.



**Obr. 3. 15. Dynamometr s odporovým tenzometrem, 1 – měrné tělísko, 2 – plastická hmota k vyrovnání možné nerovnoběžnosti dosedacích ploch a, b, 3 - plášť[1]**

### 3.3. Prototyp CNC frézky

Tento prototyp CNC frézky byl sestaven v rámci disertační práce, kterou vypracoval pan Ing. Petr Zelený, Ph.D. Zařízení bylo vyvinuto zejména pro frézování lehce obrobitelných materiálů (umělé dřevo, hliník). Rám je sestaven z hliníkových profilů firmy ITEM. Jednotlivé profily jsou pospojovány pomocí spojovacích prvků, jako jsou šrouby, tvarové spoje apod. Pohyby ve všech osách obstarávají řemenové lineární pohony. Další základní informace jsou popsány v níže uvedené tabulce (tab. 3.1.).

Pracovní prostor stroje [mm]	229 x 234 x 127
Posuv [m/min]	10
Zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]	0,5
Přesnost polohování [mm]	$X \pm 0,08$ $Y \pm 0,04$ $Z \pm 0,04$
Tuhost ve směru os [ $\text{N}/\mu\text{m}$ ]	X - 0,25 Y - 0,14
Pohon - mechanismus	ozubený řemen
Pohon - motor	servopohon YASKAWA - 400 W; 1,27 Nm; 3000 ot/min
Řídící systém	Acramatic 2100
Vřeteno	IBAG HF 45,2 S 80 CP - 375 W; 5000 - 50000 ot/min

Tab. 3.1. Parametry stroje [6]



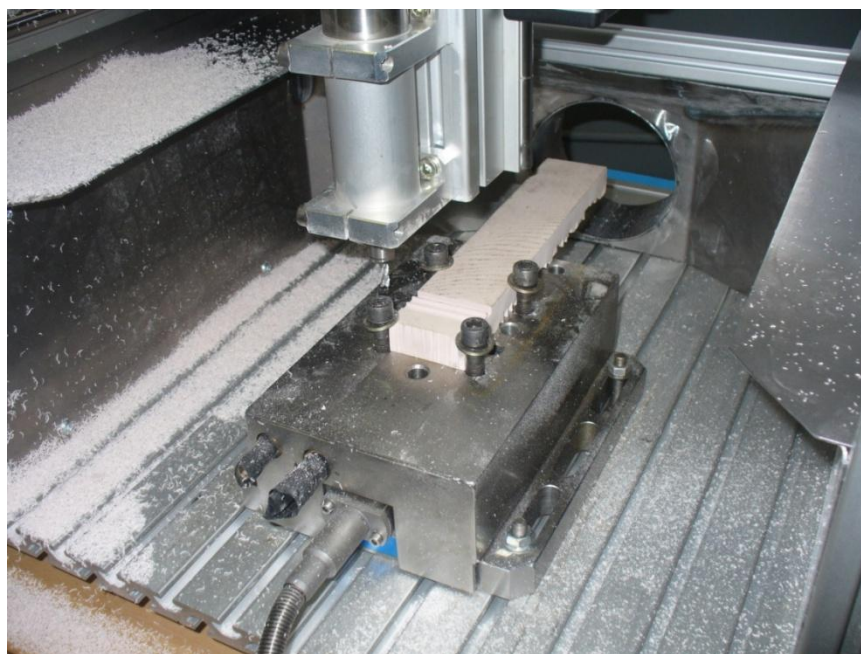
Obr. 3.16. Prototyp CNC frézky

## 4. Praktické provedení měření

### 4.1. Vlastní měření řezných sil

Cílem měření bylo zjistit největší síly působící na rám frézky při obrábění umělého dřeva (příloha IV.). Proto byly měněny některé z faktorů ovlivňujících velikost těchto sil a bylo zkoumáno, při kterých podmínkách budou síly nejvyšší.

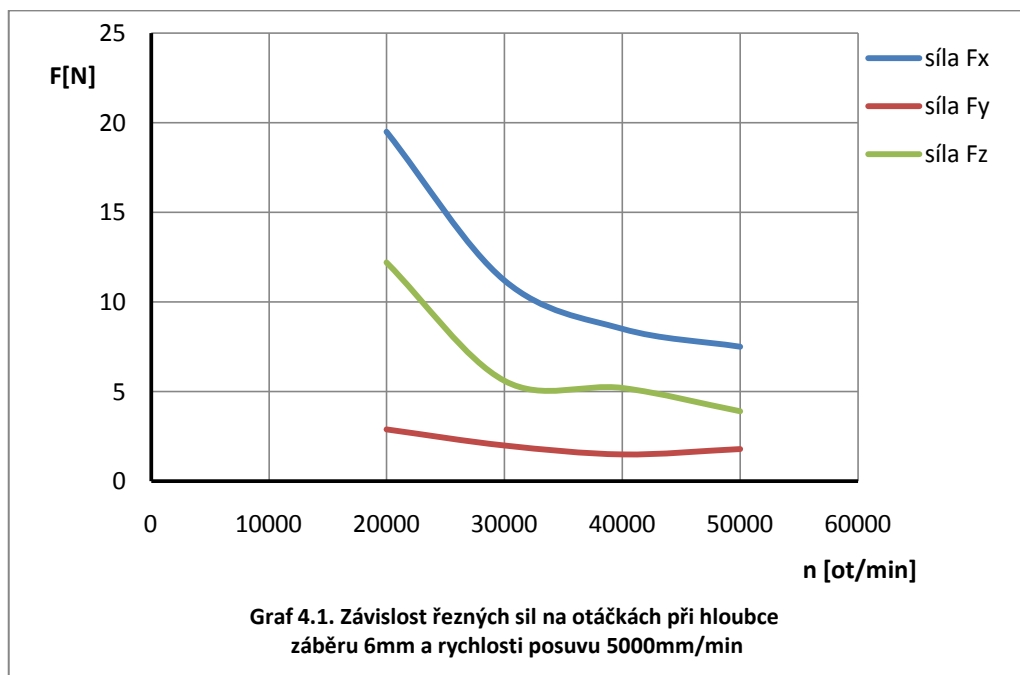
Měření řezných sil bylo provedeno následujícím způsobem: nejprve byly ponechány konstantní otáčky na hodnotě 10tis. ot/min a rychlost posuvu byla nastavena na 2500mm/min. Postupně byla zvyšována hloubka záběru od 2mm až na hodnotu 6mm, což je maximální hloubka odpovídající průměru frézy. Navyšování hloubky proběhlo po dvou milimetrech. Nadále byla zvyšována rychlost posuvu na hodnotu 5000mm/min, při zachování stávajících otáček. Měření ovšem neproběhlo dle očekávání, jelikož při zvýšení hloubky záběru na 4mm došlo ke zlomení frézy. Tudíž na hloubku záběru 6mm, při těchto podmínkách, již nemělo smysl pokračovat. Obdobným postupem byly naměřeny síly i pro 20, 30, 40 a 50tis. ot/min. U každých otáček bylo rovněž měreno při dvou odlišných rychlostech posuvu, nejprve 2500mm/min a následně 5000mm/min. Šířka vzorku na kterém proběhlo měření byla 47mm. Řezná síla je rozložena do třech složek, přičemž  $F_x$  je složka ve směru posuvu,  $F_y$  je složka na ní kolmá a  $F_z$  je složka odpovídající ose frézy.



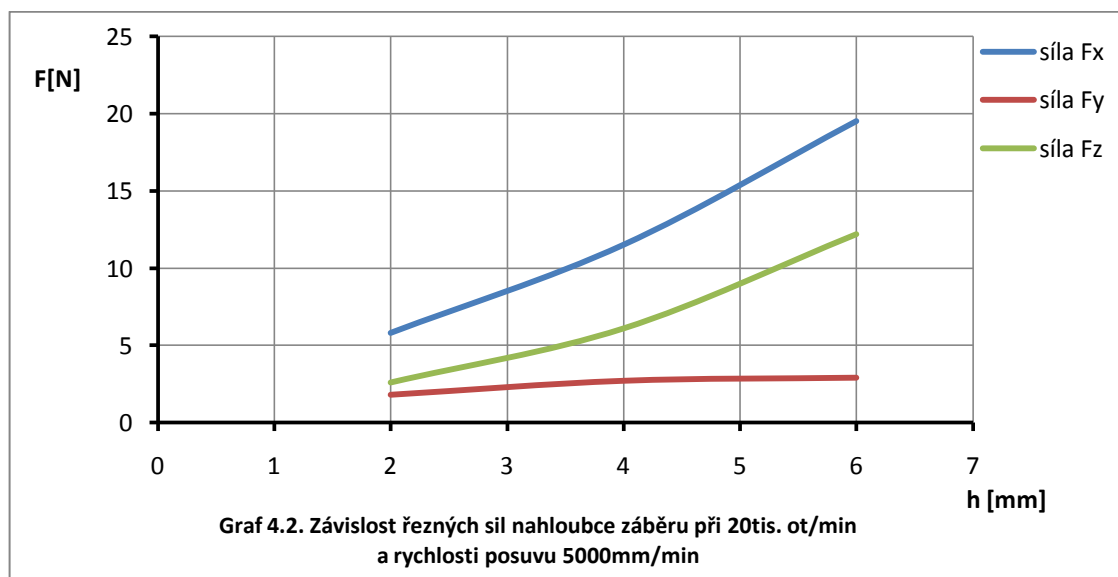
Obr. 4.1. Dynamometr Kistler typ 9257B s upnutým obrobkem

#### 4.1.1. Analýza výsledků naměřených sil

Z naměřených hodnot a vygenerovaných grafů vyplývá, že největší řezné síly vznikají za nízkých otáček, vysoké rychlosti posuvu a hloubky záběru (graf 4.1.).

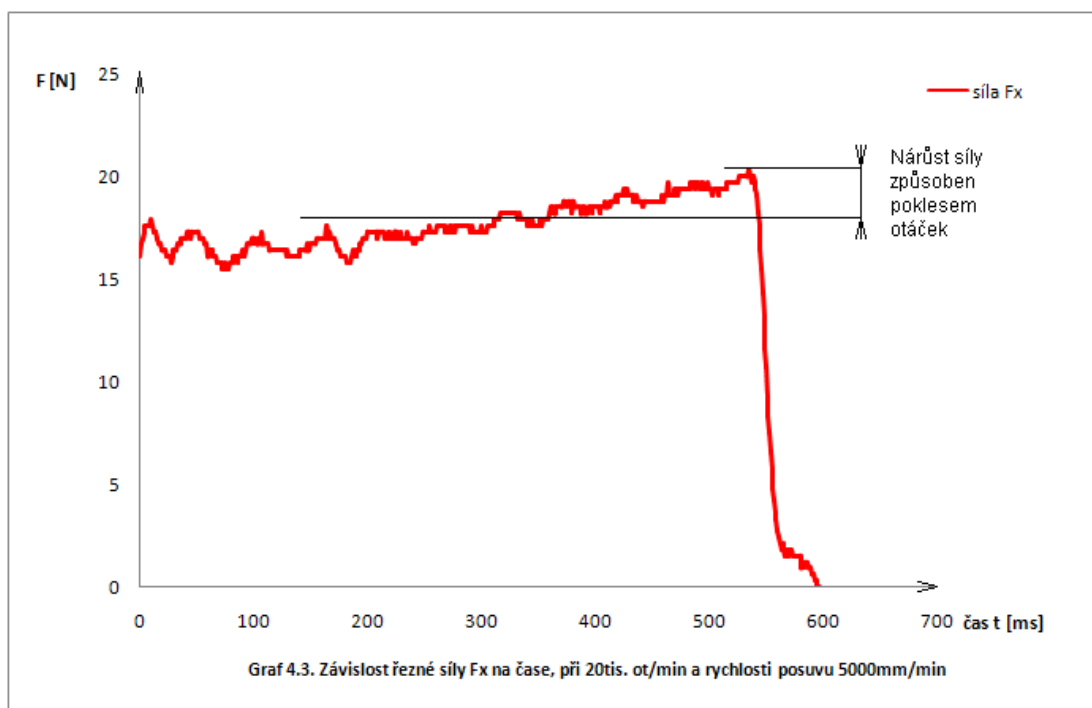


Při hloubce záběru 6mm a rychlosti posuvu 5000mm/min nebylo možno použít otáčky 10tis. ot/min, jelikož by opět hrozilo zničení frézy. Proto nejvyšší řezné síly byly naměřeny při parametrech 20tis. ot/min, rychlosti posuvu 5000mm/min a hloubce záběru 6mm. Při těchto hodnotách bylo docíleno ve směru osy  $x$  síly o velikosti 19,5N, ve směru osy  $y$  síly 2,9N a ve směru osy  $z$  síly 12,2N. Výsledky jsou rovněž patrné z grafu 4.2. který naznačuje průběh závislosti řezné síly na hloubce záběru.

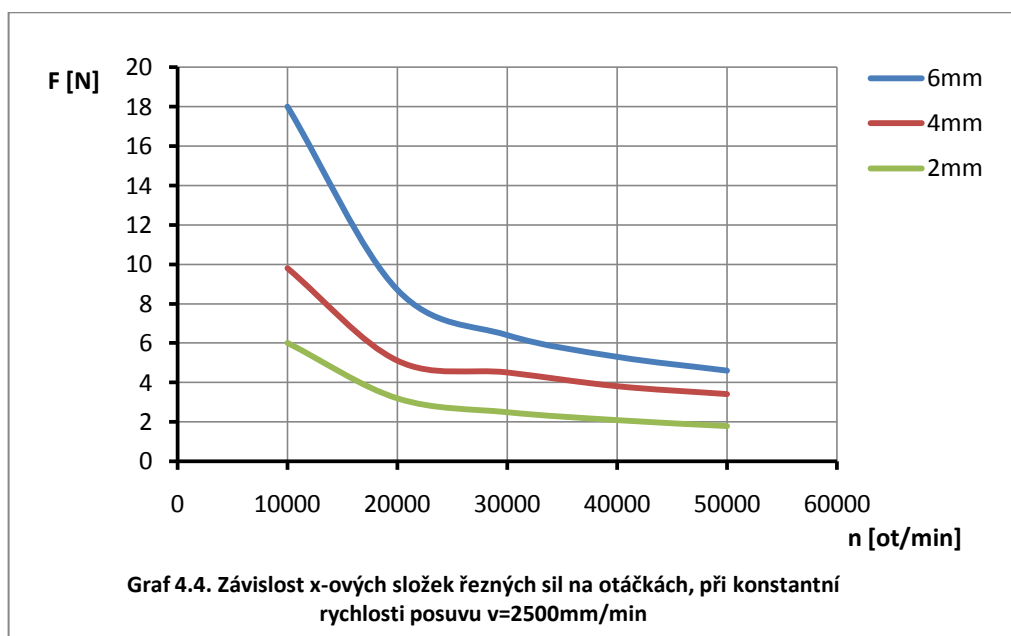




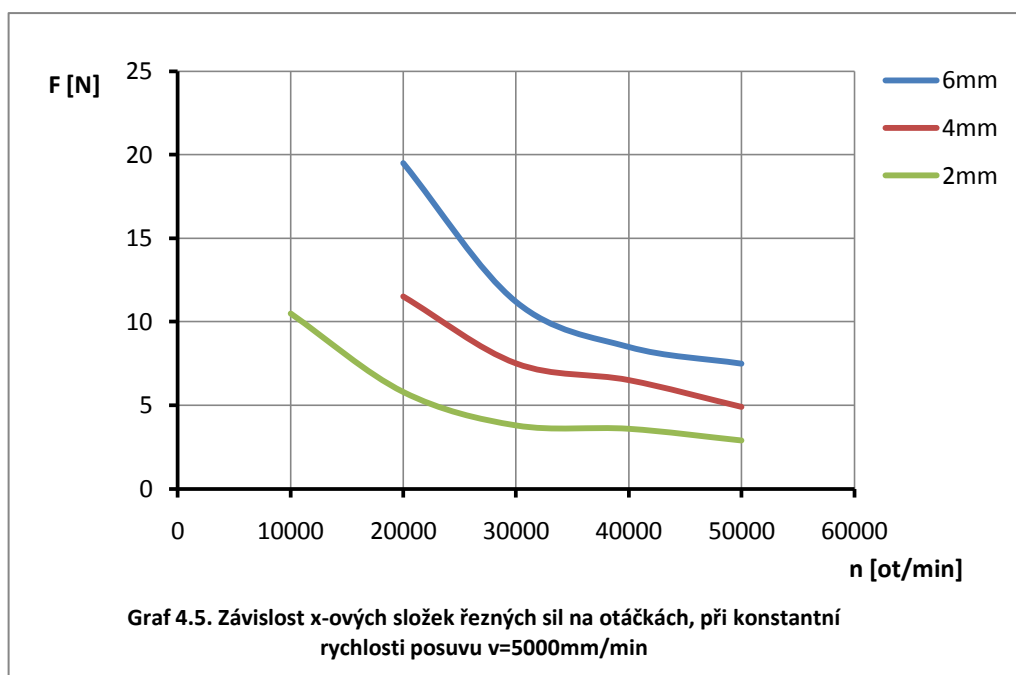
V tomto extrémním případě docházelo k takovému odporu, že v průběhu frézování začaly klesat otáčky a řezné síly nadále narůstaly. Nejmarkantnější to bylo u složky  $F_x$  (složka ve směru posuvu). Tuto situaci popisuje graf 4.3. kde síla  $F_x$  je závislá na čase  $t$ .



Řezná síla, jak bylo již napsáno výše, je také závislá na hloubce záběru. V následujících grafech (4.4. a 4.5.) jsou znázorněny  $x$ -ové složky řezné síly v závislosti na otáčkách, kde každá křivka představuje odlišnou hloubku záběru (2, 4, 6mm). Z grafů jasně vyplývá, že síla roste jak s hloubkou záběru, tak s klesajícími otáčkami.



Pro větší rychlost posuvu a nízké otáčky, dosahovaly řezné síly ještě vyšších hodnot. Tyto parametry byly pro frézování velice nepříznivé, hrozilo nebezpečí zničení frézy. Proto u grafu 4.5. začínají řezné síly pro hloubku záběru 4 a 6mm až u hodnoty 20tis. ot/min.



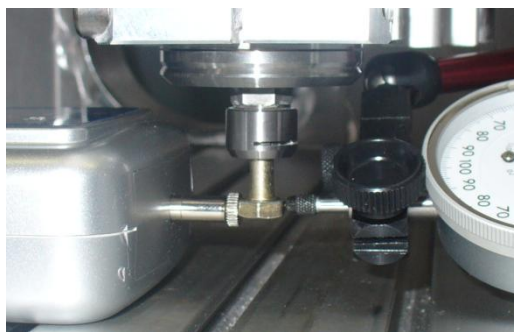
#### 4.2. Vlastní měření tuhosti rámu

Při měření tuhosti rámu se vycházelo z maximálních složek řezných sil, které byly naměřeny. Těmito silami a vyššími, řádově 2,5krát, byl zatěžován rám přes vřeteno stroje. K měření sil byl použit ruční elektronický siloměr, který se pro takto malé síly hodí. Ve vřetenu byl upnutý šroub s šestihrannou hlavou, do kterého se z jedné strany opíral siloměr přitlačován šroubem opřeným v upínce. Z druhé strany se úchylkoměrem měřila výchylka (obr 4.2. a 4.3.). Souřadnice z byla v maximální poloze, což je pro tuhost rámu nejméně příznivé.



**Obr. 4.2. Měření tuhosti pomocí elektronického siloměru a úchylkoměru**

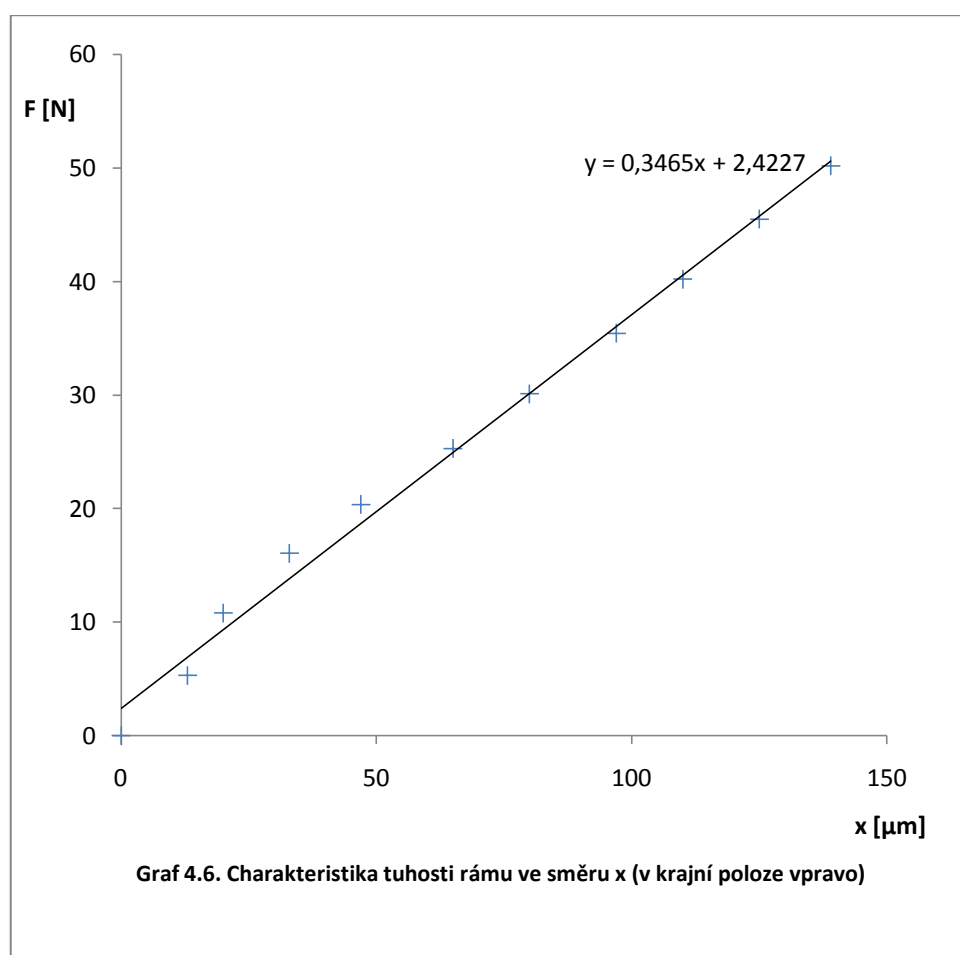
Zatížení bylo měněno od 0 až po hodnotu kolem 50N. Zatěžování se provádělo v osách stroje (x, y), přitom se postupovalo cca po 5N a pro každé zatížení se změřila výchylka.



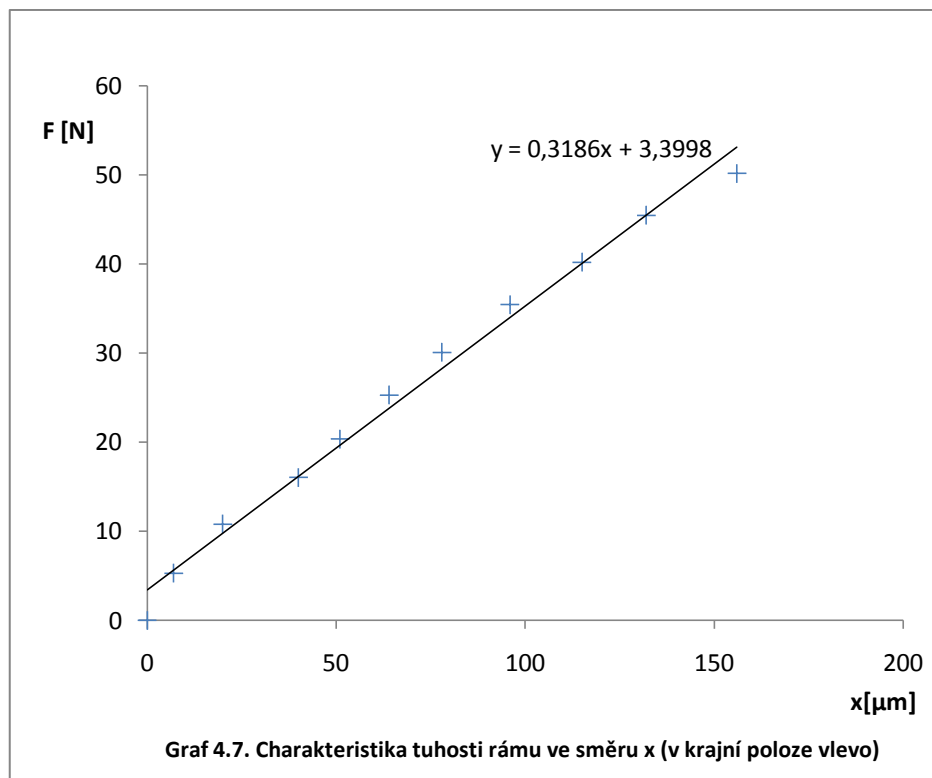
**Obr. 4.3. Detail opření siloměru a úchylkoměru**

#### 4.2.1. Analýza výsledků tuhosti rámu

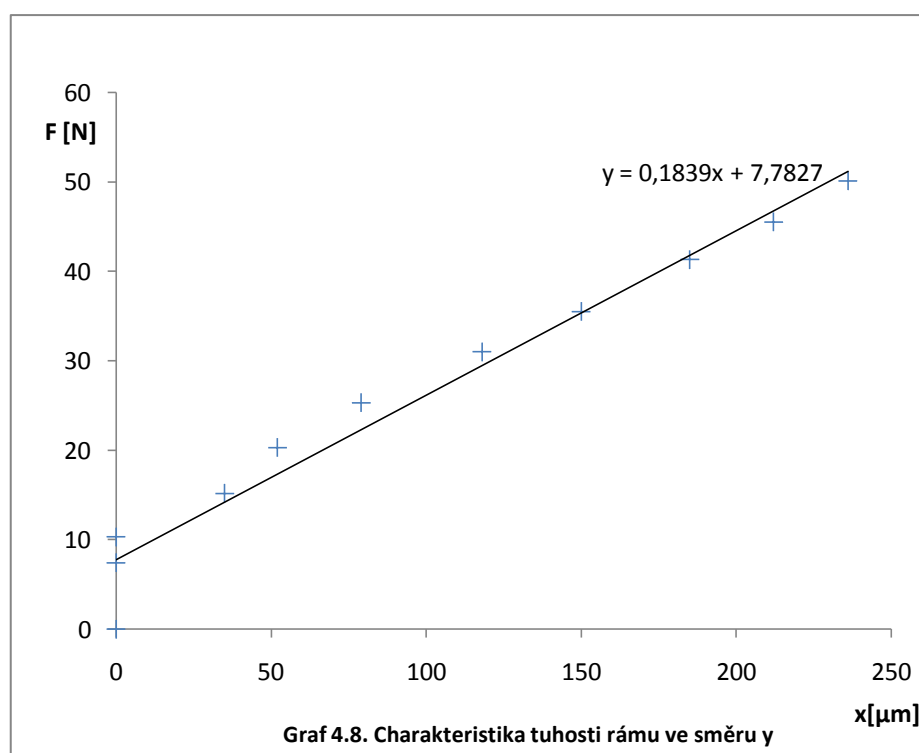
Po měření se získané hodnoty vynesly do grafu. Na osu  $x$  byla nanесena odchylka v  $\mu\text{m}$  a na osu  $y$  síla v N. Poté se body proložily přímkou a za pomoci softwaru se určila rovnice této přímky. Přičemž směrnice přímky odpovídá tuhosti rámu. V prvním případě byla měřena tuhost ve směru osy  $x$  a souřadnice stroje byly:  $X=29,3237$ ,  $Y=153,7600$ ,  $Z=7,9445$  [mm] (odpovídají krajní poloze vpravo pracovního prostoru). V tomto případě vyšla tuhost rámu  $k_{x1}=0,346 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ .



Absolutní člen rovnice přímky  $q$  je v tomto případě roven hodnotě 2,422, tudíž soustava vydržela zatížení 2,422N bez změřitelné deformace. V dalším případě byla měřena tuhost rovněž v ose  $x$ , ale v druhém směru. Souřadnice stroje byly  $X=202,7612$ ,  $Y=153,7600$ ,  $Z=7,9445$  [mm] (levá krajní poloha pracovního prostoru, osa  $z$  opět v maximální poloze). Tentokrát vyšla tuhost rámu  $k_{x2}=0,318 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ .



Poslední měření se provedlo ve směru osy  $y$ , kdy byly souřadnice stroje  $X=114,5000$ ,  $Y=126,9110$ ,  $Z=7,9445$  [mm]. Poloha suportu byla uprostřed pracovního zdvihu osy  $X$ . V této poloze se předpokládá nejnížší tuhost, protože zde bude příčný nosník nejvíce deformován. Z měření vyplývá, že tuhost v tomto směru je nejmenší z naměřených,  $k_y=0,183\text{N}.\mu\text{m}^{-1}$ .



## 5. Zhodnocení

Řezné síly vyšly nejvyšší při nízkých otáčkách, vysoké rychlosti posuvu a velké hloubce záběru. Naměřené hodnoty jsou ve směru osy  $x$  19,5N, ve směru osy  $y$  3,8N a ve směru osy  $z$ , byla naměřena síla o velikosti 12,2N. Na průběh velikosti sil se podepisuje spousta faktorů, námi byla měněna velikost rychlosti posuvu, otáčky a hloubka záběru. Konkrétní závislosti sil na těchto parametrech jsou popsány v analýze výsledků.

Zatížení od řezných sil bylo konstruktérem předpokládáno okolo 100N, při obrábění umělého dřeva byly tyto hodnoty téměř pětinnové. Tuhost uvádí ve směru osy  $x$  0,25 N. $\mu\text{m}^{-1}$  a ve směru osy  $y$  0,14 N. $\mu\text{m}^{-1}$ . Při tomto měření, vyšla tuhost v jednom směru osy  $x$  0,346 N. $\mu\text{m}^{-1}$  a ve druhém směru téže osy 0,318 N. $\mu\text{m}^{-1}$ . Rozdíl bude asi způsoben nesymetričností míst ve kterých měření proběhlo (viz. souřadnice stroje v konkrétních měřeních), nebo různou délkou řemenu. Průměrná tuhost v ose  $x$  je tedy 0,332 N. $\mu\text{m}^{-1}$  a v ose  $y$  0,183 N. $\mu\text{m}^{-1}$ . Odlišnost s hodnotami, které uvádí konstruktér, bude asi zapříčiněná ve velikostech sil, kterými soustavu zatěžoval (od 0 až po cca 550N). Při tomto měření tuhosti se vycházelo ze sil, které byly naměřeny přímo při obrábění. Proto bylo prováděno zatěžování rámu adekvátnějšími silami. Pak při zatížení maximální naměřenou silou (19,5N) vychází výchylka ve směru osy  $x$  50  $\mu\text{m}$  a ve směru osy  $y$  64  $\mu\text{m}$ . Dále v každém případě vyšla malá hodnota absolutního členu  $q$  což je obvyklé u předepnutých prvků, v našem případě řemenů.

## 6. Závěr

V rámci této bakalářské práce byly měřeny síly vznikající při obrábění na prototypu CNC frézky. Měření sil proběhlo bez větších komplikací a průběhy velikostí sil, závislé na proměnných parametrech, vyšly dle očekávání. Při měření tuhosti rámu bylo těchto hodnot využito, aby byly simulovány podmínky při reálném obrábění.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část tvoří teoretický základ a pojednává o podstatě frézování, vzniku řezných sil obecně a představuje zařízení, na kterých samotné měření proběhlo.

Další část se věnuje samotným průběhům měření, popisuje jejich postupy a vyhodnocení naměřených hodnot.

Součástí práce jsou také přílohy, kde lze nahlédnout do tabulek s hodnotami ze samotného měření (první tři). Poslední příloha obsahuje parametry umělého dřeva, na kterém proběhlo měření sil.

Námětem další práce by mohlo být důkladné proměření tuhosti v co nejvíce bodech pracovního prostoru. Přičemž by se dalo využít námi naměřených sil. Tím by se dalo určit, ve kterém místě pracovního prostoru je nejvyšší tuhost, a tudíž je poloha nejpříznivější pro upnutí obrobku. Měření tuhosti v této práci je spíše orientační, měření proběhlo jen v bodech, kde byla předpokládána nejnižší tuhost. Preciznější měření by vyžadovalo mimo jiné i jiný siloměr, díky kterému by se dalo pohodlně měřit v různých polohách pracovního prostoru. Námi zvolený siloměr byl výhodný z hlediska rozsahu, ale díky svým rozměrům nemohl být v takto malém prostoru použit v libovolném bodě. Tato okolnost zamezila měření tuhosti ve třetí ose stroje.

## Seznam použité literatury:

- [1] PÍČ, J. – BRENÍK, P.: *Obráběcí stroje, základy konstrukce a výpočtů*, SNTL Praha 1970
- [2] ŘASA, J. – GABRIEL, V.: *Strojírenská technologie 3, metody, stroje a nástroje pro obrábění*, 2000. ISBN 80-7183-207-3
- [3] KÖNIG, V.: *Obráběcí stroje, skripta*, VSŠT Liberec 1989, ISBN 80-7083-023-9
- [4] BRENÍK, P. a kolektiv: *Konstrukce a výpočty velkých obráběcích strojů*, STNL Praha 1963
- [5] POKORNÝ, P.: *Přednášky předmětu Výrobní stroje* (2009)
- [6] ZELENÝ, P.: *Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového CNC stroje-Disertační práce*, Technická univerzita v Liberci 2006
- [7] *Manuál k obsluze měřicího zařízení Kistler.*
- [8] Katalog firmy Necumer-product GmbH  
<<http://www.necumer.de/index.php?link=produkte&produkt=6>>



## Seznam Příloh:

**Příloha č. I.** Tabulky hodnot z měření obráběcích sil pro otáčky 10, 20, 30, 40, 50tis. a konstantní rychlost posuvu  $2500\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Příloha č. II.** Tabulky hodnot z měření obráběcích sil pro otáčky 10, 20, 30, 40, 50tis. a konstantní rychlost posuvu  $5000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

**Příloha č. III.** Tabulky hodnot z měření tuhosti.

**Příloha č. IV.** Vlastnosti umělého dřeva

**Příloha č. I.** Tabulky hodnot z měření obráběcích sil pro otáčky 10, 20, 30, 40, 50tis. a konstantní rychlost posuvu  $2500\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Maximální řezné síly pro 10 000 ot/min, rychlost posuvu  $v=2500\text{mm}/\text{min}$

hloubka záběru [mm]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	6	2,5	2,5
4	9,8	2,8	3,2
6	18	3,8	7

Maximální řezné síly pro 20 000 ot/min, rychlost posuvu  $v=2500\text{mm}/\text{min}$

hloubka záběru [mm]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	3,2	0,8	1,2
4	4,7	1,6	2,5
6	8,7	2	5,5

Maximální řezné síly pro 30 000 ot/min, rychlost posuvu  $v=2500\text{mm}/\text{min}$

hloubka záběru [mm]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	2,5	0,4	1,5
4	4,5	0,5	1,6
6	6,4	1,2	3,5

Maximální řezné síly pro 40 000 ot/min, rychlost posuvu  $v=2500\text{mm}/\text{min}$

hloubka záběru [mm]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	2,1	0,9	1,6
4	3,8	1,4	2,1
6	5,3	2,5	3,1

Maximální řezné síly pro 50 000 ot/min, rychlost posuvu  $v=2500\text{mm}/\text{min}$

hloubka záběru [mm]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	1,8	0,4	0,6
4	3,4	0,7	1,4
6	4,6	1,5	2,7

**Příloha č. II.** Tabulky hodnot z měření obráběcích sil pro otáčky 10, 20, 30, 40, 50tis. a konstantní rychlost posuvu 5000mm.min<sup>-1</sup>.

Maximální řezné síly pro 10 000 ot/min, rychlost posuvu v=5000mm/min

hloubka záběru [mm]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
2	10,5	2,3	4,5
4	Došlo ke zlomení frézy		
6	Měření neproběhlo		

Maximální řezné síly pro 20 000 ot/min, rychlost posuvu v=5000mm/min

hloubka záběru [mm]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
2	5,8	1,8	2,6
4	11,5	2,7	6,1
6	19,5	2,9	12,2

Maximální řezné síly pro 30 000 ot/min, rychlost posuvu v=5000mm/min

hloubka záběru [mm]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
2	3,8	1,3	1,8
4	7,5	1,6	3,5
6	11,2	2	5,6

Maximální řezné síly pro 40 000 ot/min, rychlost posuvu v=5000mm/min

hloubka záběru [mm]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
2	3,6	0,1	1,4
4	6,5	1,2	3,1
6	8,5	1,5	5,2

Maximální řezné síly pro 50 000 ot/min, rychlost posuvu v=5000mm/min

hloubka zábběru [mm]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
2	2,9	0,8	1,2
4	4,9	1,4	2,9
6	7,5	1,8	3,9

### Příloha č. III. Tabulky hodnot z měření tuhosti.

Hodnoty naměřené ve směru osy  $x$ . ( zleva doprava)

č.m.	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]	síla [N]
0	0	0
1	13	5,85
2	20	10,3
3	33	15,25
4	47	20,55
5	65	25,7
6	80	30,45
7	97	35,55
8	110	41,25
9	125	45
10	139	50,1

Hodnoty naměřené ve směru osy  $x$ . ( zprava doleva)

č.m.	Výchylka [ $\mu\text{m}$ ]	síla [N]
0	0	0
1	7	5,3
2	20	10,8
3	40	16,05
4	51	20,35
5	64	25,3
6	78	30,1
7	96	35,45
8	115	40,2
9	132	45,5
10	156	50,2

Hodnoty naměřené ve směru osy  $y$ .

č.m.	výchylka [ $\mu\text{m}$ ]	síla [N]
0	0	0
1	0	7,4
2	0	10,3
3	35	15,15
4	52	20,3
5	79	25,3
6	118	31
7	150	35,5
8	185	41,3
9	212	45,5
10	236	50,1



# NECURON® 480

## Data Sheet

1/2

### Characteristics:

- excellent processing properties
- very fine, homogeneous surface

### Applications:

- master and copy models
- styling models
- wind tunnel and water channel models
- architectural models
- general modelling

### Technical data:

Colour	apricot
Coefficient of thermal expansion	approx. $48 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Temperature resistance	approx. 65 °C
Shore D	approx. 50
Compressive strength	approx. 12 N/mm <sup>2</sup>
Flexural strength	approx. 15 N/mm <sup>2</sup>
Density	approx. 0.48 g/cm <sup>3</sup>
Abrasion resistance (at defined parameters)	approx. - mm <sup>3</sup>
Fire protection classification	B2
Electrical current resistance	approx. - $\Omega \times \text{cm}$
Notched impact strength	approx. - kJ/m <sup>2</sup>
Thermal conductivity	approx. - W/mk

- contains no halogens, plasticizer or solvent
- manufactured fluorocarbohydrate-free
- physiologically harmless

### Measurements:

1500	500	50	mm
1500	500	75	mm
1500	500	100	mm
1500	500	150	mm

surfaces machined parallel, other dimensions on request

### Storage/Transport:

NECURON®-boards should be stored on a flat underground and in a dry space at a temperature between 18°C and 25°C.

Variations in temperature should be avoided during the transport and storage.



# NECURON® 480

## Data Sheet

2/2

### Processing:

Adhesive / Putty	Colour	Mixture ratio A to B (by weight)	Pot life in minutes at 20°C	Curing time at 20°C in hours
NECURON® K2	colourless transparent	-	90	5-6
NECURON® K4	orange	2:1	3-5	18-24
NECURON® K8	colourless transparent	1:1	10	4-6
NECURON® S4	apricot	1:1	10-12	6-8

or usual and compatible patternmaking adhesives/resins

We recommend that boards are plane-parallel to ensure good glue joints.

### Machining:

Machining temperature: 20°C - 25°C

Tools: wood- or metal-working tools

### Milling parameters:

	Roughing	Finishing
Type of tool	finishing tools d=80mm	finishing tools d=80mm
Tool diameter [d] (mm)	80	80
Cutting speed [Vc] (m/sec)	50	50
Speed [n] (1/min)	12000	8000
Feed speed (m/min)	10	7
Tooth speed [fz] (mm)	0.21	0.21
Number of teeth [z]	4	4
Cutting depth [a <sub>p</sub> ] (mm)	9	0.4
Cutter mark length [f <sub>z</sub> mm] (mm)	38	10

## NECURON® 480

This material does not contain any fillers that release harmful dust during machining. Nevertheless the dust content in the air should not rise above 6 mg/m<sup>3</sup>. Safety procedures recommended by the vocational co-operative of the chemical industry should be complied with. The article is not a regulatory product according to ICC regulations. In accordance with general local and national regulations waste is to be disposed by incineration in authorised places or conveyed to authorised tips (EAK 120105).

Technical statements and recommendations refer to current standard of technique and are based on our own experience. Further developments and improvements are reserved. Due to the variety of processing possibilities own experiments are recommended to optimise results.